

# Method of representation of surface roughness in tunnels for hydraulic models

Ing. Jorge Alonso Peña Valdivia<sup>1</sup>, Phd. Jorge Reyes Salazar<sup>2</sup>, Ing. Leo Guerrero Asmad<sup>3</sup> <sup>1</sup>Universidad de Piura, Peril, [jorge.pena@udep.pe](mailto:jorge.pena@udep.pe); <sup>2</sup>Universidad de Piura, Peril, [leo.guerrero@udep.pe](mailto:leo.guerrero@udep.pe)  
<sup>3</sup>Universidad de Piura, Peril, [jorge.reyes@udep.pe](mailto:jorge.reyes@udep.pe)

*Abstract— This article aims to describe the methodology that allows us to represent the roughness in tunnels for its use in physical models. To this end, rough belts were placed along the entire length of the tunnel and separated at specific distances, which resulted in different values of roughness coefficients inside this structure. Currently, there already exist some methods of representing this phenomenon both in open and closed conduits, but these methods present some difficulties both in the flow behavior itself (due to the presence of some local phenomena) and in the transport of sediments within the ducts. Using these belts, these behaviors would be observed in a reduced physical model. For this reason, representing the values of the coefficient of surface roughness in physical models using materials that facilitate the visualization of the flow and exact representation of the geometry of the structures motivated us to investigate a method that allows us to represent the roughness values for tunnels that work with flow under pressure and gravity.*

*Keywords— Surface roughness, physical modeling, tunnels.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.269>  
ISBN: 978-0-9993443-0-9  
ISSN: 2414-6390

# Método de representación de la rugosidad superficial en túneles para modelos hidráulicos

Ing. Jorge Alonso Peña Valdivia<sup>1</sup>, Phd. Jorge Reyes Salazar<sup>2</sup>, Ing. Leo Guerrero Asmad<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Piura, Perú, [jorge.pena@udep.pe](mailto:jorge.pena@udep.pe); Universidad de Piura, Perú, [leo.guerrero@udep.pe](mailto:leo.guerrero@udep.pe)

<sup>2</sup>Universidad de Piura, Perú, [jorge.reyes@udep.pe](mailto:jorge.reyes@udep.pe)

**Resumen**– *El presente artículo tiene como finalidad describir la metodología que permitió representar la rugosidad en túneles para su uso en modelos físicos. Para lograrlo se utilizaron cintas rugosas colocadas a lo largo de toda la longitud del túnel y separadas a distancias específicas, las cuales daban como resultado distintos valores de coeficientes de rugosidad en el interior de esta estructura. En la actualidad ya existen algunos métodos de representación de este fenómeno tanto en conductos abiertos como en cerrados, pero éstos presentan algunas dificultades tanto en el comportamiento mismo del flujo, debido a la presencia de algunos fenómenos locales, como en el transporte de sedimentos en el interior de los conductos. Usando estas cintas se lograría observar estos comportamientos en un modelo físico reducido.*

*Por tal motivo, representar los valores del coeficiente de rugosidad superficial en modelos físicos, utilizando materiales que faciliten la visualización del flujo y la representación exacta de la geometría de las estructuras, motivaron a investigar un método que permita representar los valores de rugosidad para túneles que trabajan con flujo a presión y a gravedad.*

**Palabras Claves** - *Rugosidad superficial, modelación física, túneles*

## I. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de las características geológicas e hidráulicas son parte importante en el desarrollo de grandes proyectos, y estos abarcan varios procesos muy complejos que incluso la dinámica de fluidos tradicional es incapaz de analizarlos y describirlos. Es por eso que se recurre a la experimentación en modelos físicos para poder estudiar y observar algunos fenómenos naturales, brindando soluciones prácticas a determinadas estructuras hidráulicas sometidas a flujos dinámicos, logrando optimizar su comportamiento estructural, su desarrollo constructivo, su estudio económico y por último, y muy importante, minimizar el riesgo de vidas humanas [1].

El estudio en modelos físicos abarca cierta complejidad que requiere de por sí un amplio desempeño técnico e intelectual para poder desarrollar cada parte geométrica que conforman un modelo físico. La semejanza entre el prototipo y el modelo debe estar bien definida y construido a la perfección para poder vincular con gran exactitud los resultados obtenidos en el modelo físico y el futuro comportamiento del fluido en el prototipo [1]. Por tal motivo en el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico de gran

envergadura es trascendental considerar la elaboración de un modelo físico.

En cada modelo se aplican distintos criterios de semejanza para determinar físicamente algunas características mismas de cada proyecto, por tal motivo, es importante llegar a representar el valor de la rugosidad correspondiente a las estructuras. La importancia de esta rugosidad es debido a que, gracias a esta, podemos llegar a determinar la pérdida de energía que se produciría en un conducto específico (abierto o cerrado) [2] y así poder contribuir a un buen diseño de las distintas estructuras hidráulicas, de modo que su representación en algún modelo físico debería hacerse con plena exactitud [1].

Gracias al desarrollo de un modelo físico de un proyecto real, como lo fue la Central Hidroeléctrica de Chaglla, y a una investigación desarrollada en la Universidad de Piura [1] se tuvo la oportunidad de centrar el objetivo de esta investigación en lograr representar la rugosidad en los túneles de excedencia que se muestran en la Figura 1. Este factor fue importante debido a que, gracias a esto, se pudieron obtener los niveles de agua para poder definir así la altura total de la presa y su borde libre.

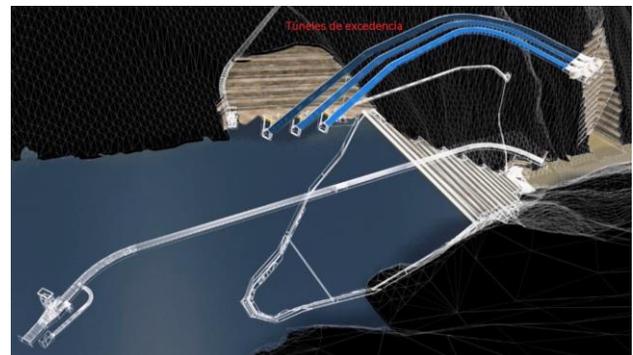


Fig. 1 Esquema de la zona de represamiento del Proyecto de la Central Hidroeléctrica de Chaglla.

## II. OBJETIVO

El presente artículo tiene como objetivo representar la rugosidad superficial de túneles en modelos hidráulicos mediante el uso de cintas rugosas. De este modo se podría tener en cuenta el comportamiento interno del flujo y del transporte de sedimentos en el interior de los túneles en el

modelo, logrando así observar y analizar estos fenómenos para un posible trabajo en el diseño de las estructuras.

### III. OBTENCIÓN DE LA RUGOSIDAD EN MODELOS HIDRÁULICOS

En el amplio mundo de la modelación hidráulica se han llevado a cabo gran cantidad de modelos hidráulicos, físicos y numéricos; a lo largo de este tiempo se han planteado distintos tipos de hipótesis para poder llegar a modelar con mucha aproximación el comportamiento del flujo sobre las estructuras [3]. Tal es el caso de la rugosidad superficial interna en túneles, para la obtención de este factor se tienen tres importantes alternativas:

1) *Alternativa 1:* Colocación de obstáculos del mismo material que las paredes; se refiere al empleo de pequeños bloques de diferentes dimensiones, elaborados del mismo material que la superficie interna del túnel, y con distintas magnitudes de distanciamiento entre cada uno de estos, formando así un arreglo uniforme.

2) *Alternativa 2:* Colocación de una capa de sedimentos en las paredes del conducto; se refiere a la colocación de sedimentos de distinta granulometría en toda el área superficial interior del túnel, aportando así una cierta aspereza en todo el perímetro de la sección del túnel.

3) *Alternativa 3:* Incorporación de nuevos materiales para modificar la rugosidad; se refiere al uso de nuevos materiales, que al adherirlos usando distintos tipos de arreglos de colocación a la superficie interna del túnel, otorgarían distintos tipos de valores de rugosidad sin poder generar algunos fenómenos locales y que sea posible la visibilidad del flujo en su interior.

Si bien es cierto cualquiera de las tres alternativas genera una pérdida de energía por rugosidad superficial, quedando en claro que se cumpliría dicho factor de rugosidad. Sin embargo, en las dos primeras alternativas se estarían produciendo algunos fenómenos locales los cuales no suelen presentarse en la realidad, mientras que, en la tercera, éstos fenómenos se evitarían y se mejoraría la visibilidad tanto del flujo como del comportamiento de los sedimentos en el interior del túnel.

En la construcción de modelos físicos hidráulicos se emplea un material transparente como lo es el acrílico, el cual brinda un mejor manejo al momento de darle la forma requerida y también mejora la visibilidad del flujo al entrar en contacto con el mismo. Podría ser un excelente material para el uso en la construcción de canales y túneles en modelos a escala, pero su único inconveniente es poseer una superficie muy lisa, incluso semejante a la del vidrio, por tal motivo,

siempre se ha visto en la necesidad de utilizar materiales, los cuales, incorporados al acrílico, le brindan al mismo un valor de rugosidad considerable. Para este estudio, el material que se utilizó para generar la rugosidad fueron unas cintas rugosas, las mismas que son usadas como medio de seguridad en el acabado de las escaleras como se muestra en la Figura 2.



Fig. 2. Cinta rugosa utilizada en la industria de acabados de seguridad en escaleras.

### III. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA OBTENCIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

#### A. Formulación de los ensayos

Para esta investigación se llevaron a cabo 2 grupos de ensayos, el primero desarrollado en un canal de prueba de sección rectangular y el segundo en un conducto cerrado de sección compuesta. En ambos casos se determinó la pérdida de carga a lo largo de todo el conducto. Según [5] esta pérdida de carga representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de un conducto por efecto del rozamiento. Las fórmulas que gobiernan esta pérdida de energía y que se han considerado en esta investigación son:

- *Trinomio de Bernoulli:*

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \Delta H_C + \Delta H_L = Cte \quad (1)$$

- *Ecuación de Continuidad:*

$$Q = A v = Cte \quad (2)$$

Siendo:

$H$	Altura de energía	(m.c.a)
$g$	Gravedad de la tierra	(m/s <sup>2</sup> )
$Z$	Cota de medida	(m)
$P$	Presión del tubo	(N/m <sup>2</sup> )
$\gamma$	Peso específico del fluido	(kg/m <sup>3</sup> )
$Q$	Caudal circulante	(m <sup>3</sup> /s)
$v$	Velocidad media de circulación	(m/s)
$A$	Área de la sección del tubo	(m <sup>2</sup> )

$\Delta H_C$	Pérdida de carga continua	(m)
$\Delta H_L$	Pérdida de carga localizada	(m)

Para determinar la pérdida de carga continua utilizamos dos fórmulas:

- *Manning*: usado para el caso de flujos en conductos abiertos [5].

$$\Delta H_C = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \cdot L \quad (3)$$

- *Darcy – Weisbach*: usado para el caso de flujos en conductos cerrados [5].

$$\Delta H_C = 0.0826 \cdot f \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5}\right) \cdot L \quad (4)$$

Como en ambos casos se obtienen distintos coeficientes de rugosidad “*n*” (para el caso de conductos abiertos) y “*f*” (para conductos cerrados), por tal motivo se utilizó una correlación entre estos dos coeficientes planteándolo con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \quad (5)$$

## B. Dimensionamiento y construcción de los ensayos

### 1.- Canal de prueba:

Como se puede observar en la Figura 3, el canal se encontraba dividido en tres tramos, el primero construido de albañilería revestido con mortero y con un acabado pulido, este tramo tenía una longitud de 3.35 m. El siguiente tramo estaba elaborado con acrílico de 6 mm. de espesor, este tramo tenía una longitud total de 4.93 m. y una altura continua al tramo anterior, el acrílico estaba colocado tanto en la zona de las paredes como en la del fondo. En esta zona es donde se colocarán las cintas rugosas distanciadas equitativamente y abarcando todo el perímetro de la sección del canal. El siguiente y último tramo era de características similares al primero, la única diferencia era en la longitud, la cual era de 3.54 m. La sección característica del canal tiene un ancho constante de 0,32 m. y una altura de 0,53 m. el cual se muestra en la Figura 4.

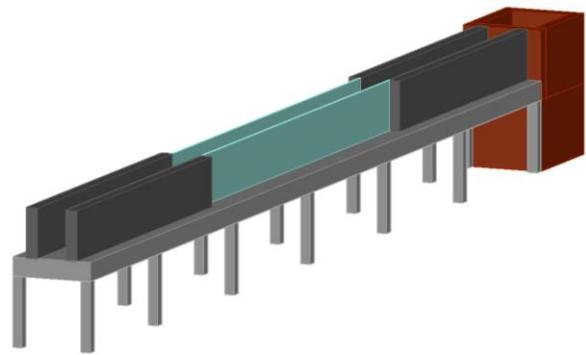


Fig. 3. Vista en 3D de la estructura utilizada para los ensayos en canal de prueba.

### 2.- Túnel de sección compuesta:

Tal como se muestra en la Figura 4 la sección típica para estos ensayos era una sección cerrada compuesta de 0.29 m. de altura y 0.25 m. de ancho aproximadamente y una longitud de túnel de 3.4m.

El modelo completo se dividía en cuatro partes: Sistema de alimentación, tanque de entrada, túnel, tanque de salida y por último el sistema de retorno. El túnel se elaboró con acrílico de 6 mm. de espesor, para llegar a obtener algunas formas características de esta sección se utilizó un horno eléctrico y unos moldes elaborados en madera. Como material adhesivo se utilizó cloroformo para unir las piezas rectas con las curvas.

El túnel estaba conformado por dos tramos, cada uno con una longitud de 1.8 m. quedando una longitud de embotamiento de 10 cm. tanto en el tanque de entrada como en el de salida. Para la medición de presiones en el interior del túnel se colocaron piezómetros en la parte inferior de este, teniendo un total de 4 secciones para dicha medición, las cuales estaban distanciadas cada 0.5 m (1 m, 1.5m, 2m y 2.5 m. medidos desde el inicio del conducto). Para la colocación de las cintas rugosas en la superficie interior, se elaboraron dos orificios en la parte superior del túnel, esto se hizo para poder realizar la instalación de las cintas rugosas, estos orificios permitían una mejor colocación y cambio en la distancia de separación entre cintas en toda la longitud del túnel.

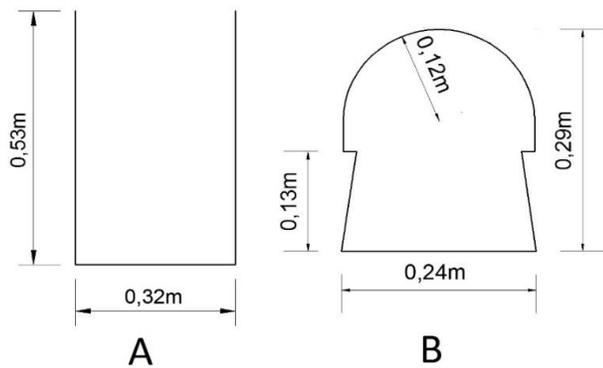


Fig. 4. Sección transversal del Canal de prueba (A) y del túnel de sección compuesta (B).

### C. Ensayos en canal de prueba de sección rectangular

Las distancias de separación entre cintas antideslizantes en estos ensayos fueron de 5cm, 10cm, 15cm y 30cm. Cada uno medidos desde los bordes de cada cinta. Para todos los ensayos se midieron velocidades y niveles de agua en secciones de mediciones específicas.

Las alturas de agua se midieron utilizando limnímetros de precisión en 10 secciones del canal ubicadas a 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0, 3.25, 3.54, 3.72 y 4.0 m. de longitud. A modo de comprobación se realizaron algunas medidas utilizando una cinta métrica. Las velocidades fueron medidas en dos secciones representativas: a 1.5 y a 3.0 m., estas velocidades sirvieron para verificar el caudal que pasaba por el canal.

Con estos datos se procedió a calcular el valor de rugosidad “n” de cada una de las distancias de separación entre cintas antideslizantes utilizando la ecuación (3). En la Tabla 1 se muestran los valores para encontrar el coeficiente de rugosidad “n” considerando únicamente los datos de dos secciones de medición (donde se midieron las velocidades).

TABLA I  
CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD POR CADA DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE CINTAS.

Datos	1° Ensayo	2° Ensayo	3° Ensayo	4° Ensayo
Distancia Cintas (cm)	30.0	15	10	5
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0254	0.0221	0.0224	0.0240
Altura 1 (m) (A1)	0.0995	0.0991	0.0994	0.1031
Velocidad 1 (m/s)	0.8062	0.7163	0.7872	0.7699
Altura 1 (m) (A1+B1)	0.1326	0.1253	0.1310	0.1333
Altura 2 (m) (A2)	0.0820	0.0832	0.0852	0.0931
Velocidad 2 (m/s)	0.8926	0.8028	0.8131	0.7786
<b>n</b>	<b>0.0101</b>	<b>0.0112</b>	<b>0.0129</b>	<b>0.0156</b>

En los resultados se logra observar que mientras más se disminuye la distancia de separación entre cintas, mayor es el valor de rugosidad “n” en el canal, teniendo un valor del mismo de 0,0101 para la separación de 30 cm. y llegando

hasta 0,0156 para una separación de 5 cm. Esta variación se logra observar en la Figura 5.

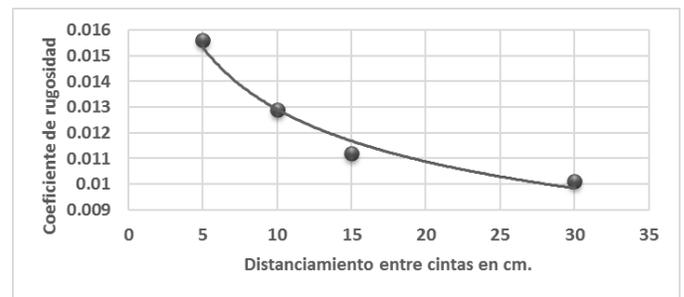


Fig. 5. Valor de la distancia de separación vs coeficiente de rugosidad

### D. Ensayos en túnel de sección compuesta

En este conducto se llevaron a cabo tres grupos de ensayos: el primer grupo sin cintas rugosas, el segundo con cintas separadas a 10.4 cm. y el tercero con cintas separadas a 4 cm; cada uno con tres caudales distintos. Para cada uno de los caudales se tomaron datos de presión de agua dentro del túnel utilizando piezómetros colocados en 4 secciones del túnel (P1, P2, P3, P4), las cuales estaban ubicadas a 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5m. medidos desde el inicio del conducto. Con estos datos se procedió a calcular el valor de fricción “f” de cada una de las distancias de separación entre cintas antideslizantes utilizando la ecuación (4). A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados.

#### 1.- Sin cintas (sólo acrílico):

Como se puede observar en la Figura 6 el túnel no contenía ninguna cinta rugosa colocada en su superficie interior, por lo tanto, el resultado que se esperaba en estos ensayos era la rugosidad misma del acrílico, ya que era el único material que contenía la superficie del conducto.



Fig. 6. Ensayo del túnel de 3.4 m. sin cintas en toda su longitud

Para esta situación se ensayaron 3 caudales: 0.0431 m<sup>3</sup>/s, 0.0815 m<sup>3</sup>/s y 0.1047 m<sup>3</sup>/s, los resultados obtenidos en los estos se usan para determinar los coeficientes de fricción para cuatro tramos del túnel. Dichos resultados se muestran en las siguientes tablas.

TABLA II  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0431 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°1				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0431	0.0431	0.0431	0.0431
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	0.6631	0.6631	0.6631	0.6631
Altura Inicial (m)	1.1050	1.1050	1.1038	1.1050
Altura Final (m)	1.1038	1.1024	1.1024	1.1013
<b>f</b>	<b>0.016</b>	<b>0.0159</b>	<b>0.0159</b>	<b>0.0158</b>

TABLA III  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0815 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°2				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0815	0.0815	0.0815	0.0815
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	1.2538	1.2538	1.2538	1.2538
Altura Inicial (m)	1.2868	1.2868	1.2825	1.2868
Altura Final (m)	1.2825	1.2780	1.2780	1.2731
<b>f</b>	<b>0.016</b>	<b>0.0159</b>	<b>0.0158</b>	<b>0.0159</b>

TABLA IV  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.1047 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°3				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.1047	0.1047	0.1047	0.1047
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	1.6108	1.6108	1.6108	1.6108
Altura Inicial (m)	1.3255	1.3255	1.3185	1.3255
Altura Final (m)	1.3185	1.3110	1.3110	1.3030
<b>f</b>	<b>0.0161</b>	<b>0.0158</b>	<b>0.0157</b>	<b>0.016</b>

Según los valores obtenidos, el coeficiente de fricción “*f*” promedio para esta situación sería de 0.0159, con el cual utilizándolo en la ecuación de correlación (5) se obtiene un coeficiente de rugosidad “*n*” de 0.009.

## 2.- Distancia de separación de 10.4 cm.:

Como se muestra en la Figura 7, el túnel contenía cintas rugosas en su superficie interior colocadas a una distancia de separación de 10.4 cm.



Fig. 7. Ensayo del túnel de 3.4 m. con distanciamiento entre cintas de 10,4 cm en toda su longitud.

Para esta situación se ensayaron nuevamente otros 3 caudales: 0.0624 m<sup>3</sup>/s, 0.0971 m<sup>3</sup>/s y 0.141 m<sup>3</sup>/s. Nuevamente estos resultados se usan para determinar los coeficientes de fricción para los mismos cuatro tramos del túnel utilizados en la situación anterior. Dichos resultados se muestran en las siguientes tablas.

TABLA V  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0624 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°4				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0624	0.0624	0.0624	0.0624
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	0.9600	0.9600	0.9600	0.9600
Altura Inicial (m)	1.0488	1.0488	1.0460	1.0488
Altura Final (m)	1.0460	1.0413	1.0413	1.0360
<b>f</b>	<b>0.0278</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0279</b>

TABLA VI  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0971 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°5				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0971	0.0971	0.0971	0.0971
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	1.4938	1.4938	1.4938	1.4938
Altura Inicial (m)	1.2750	1.2750	1.2678	1.2750
Altura Final (m)	1.2678	1.2560	1.2560	1.2435
<b>f</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0282</b>	<b>0.0282</b>

TABLA VII  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.141 M<sup>3</sup>/S

Ensayo N°6				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.1410	0.1410	0.1410	0.1410
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	2.1692	2.1692	2.1692	2.1692
Altura Inicial (m)	1.3410	1.3410	1.3250	1.3410
Altura Final (m)	1.3250	1.3005	1.3005	1.2715
<b>f</b>	<b>0.0279</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0282</b>	<b>0.0281</b>

Según los valores obtenidos, el coeficiente de fricción “ $f$ ” promedio para esta nueva situación sería de 0.0282, con el cual utilizándolo en la ecuación de correlación (5) se obtiene un coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de 0.012.

### 3.- Distancia de separación de 4 cm.:

Para este último grupo de ensayos, el túnel contenía cintas rugosas en su superficie interior colocadas a una distancia de separación de 4 cm. tal como se muestra en la Figura 8.



Fig. 8. Ensayo del túnel de 3.4 m. con distanciamiento entre cintas de 4 cm en toda su longitud.

Para esta situación se ensayaron otros 3 caudales: 0.0245 m<sup>3</sup>/s, 0.0311 m<sup>3</sup>/s y 0.0708 m<sup>3</sup>/s. Nuevamente estos resultados se usan para determinar los coeficientes de fricción para los mismos cuatro tramos del túnel. utilizados en la situación anterior. Estos resultados se muestran en las siguientes tablas.

TABLA VIII  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0245 M3/S

Ensayo N°7				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0245	0.0245	0.0245	0.0245
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	0.3769	0.3769	0.3769	0.3769
Altura Inicial (m)	0.8126	0.8126	0.8116	0.8126
Altura Final (m)	0.8116	0.8102	0.8102	0.8090
$f$	<b>0.0455</b>	<b>0.0454</b>	<b>0.0454</b>	<b>0.0453</b>

TABLA IX  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0311 M3/S

Ensayo N°8				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0311	0.0311	0.0311	0.0311
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	0.4785	0.4785	0.4785	0.4785
Altura Inicial (m)	1.0921	1.0921	1.0906	1.0921
Altura Final (m)	1.0906	1.0886	1.0886	1.0867
$f$	<b>0.0453</b>	<b>0.0453</b>	<b>0.0452</b>	<b>0.0454</b>

TABLA IX  
CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD  
PARA Q: 0.0708 M3/S

Ensayo N°9				
Tramo	P1 - P2	P1 - P3	P2 - P3	P1 - P4
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0708	0.0708	0.0708	0.0708
Área (m <sup>2</sup> )	0.0650	0.0650	0.0650	0.0650
Perímetro (m)	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Velocidad (m/s)	1.0892	1.0892	1.0892	1.0892
Altura Inicial (m)	1.2847	1.2847	1.2767	1.2847
Altura Final (m)	1.2767	1.2667	1.2667	1.2563
$f$	<b>0.0455</b>	<b>0.0453</b>	<b>0.0452</b>	<b>0.0454</b>

Según estos últimos valores obtenidos, el coeficiente de fricción “ $f$ ” promedio para esta situación sería de 0.0454, con el cual utilizándolo en la ecuación de correlación (5) se obtiene un coeficiente de rugosidad “ $n$ ” de 0.0152.

## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que el valor de la rugosidad superficial “ $n$ ”, presente en el interior del túnel de ensayo cuando no existía ninguna cinta rugosa adherida en su superficie, es de 0.009, el cual es un valor similar al del vidrio, de modo que, se puede utilizar acrílico o vidrio como material de construcción de modelos físicos, siempre y cuando la geometría de la estructura lo amerite.

De acuerdo a la Figura 5, con los resultados obtenidos en los ensayos en el canal de prueba de sección rectangular se consigue un gráfico en el cual se vincula el valor de la distancia de separación entre cintas y el valor del coeficiente de rugosidad “ $n$ ” para cada distancia. Este gráfico nos brinda información de cuál sería el valor de la distancia de separación entre cintas rugosas de acuerdo con el coeficiente de rugosidad requerido en algún modelo cuyo coeficiente esté en el rango de 0.01 y 0.016.

Debido a que los resultados obtenidos en esta investigación son limitados para secciones similares a los conductos utilizados en los ensayos, se considera oportuno recomendar la diversificación de este método para distintos tipos de secciones, ya sea en modelos de canales o de túneles; relacionando quizás el coeficiente de rugosidad, el radio hidráulico y el área de la sección con el distanciamiento entre cintas antideslizantes utilizado. Por tal motivo en la Figura 8 se presenta un gráfico donde se pueden encontrar valores del coeficiente de rugosidad “ $n$ ” según el valor adimensional “ $P$ ” que es obtenido dividiendo el Área rugosa sobre el Área total en 1m. de longitud de un conducto.

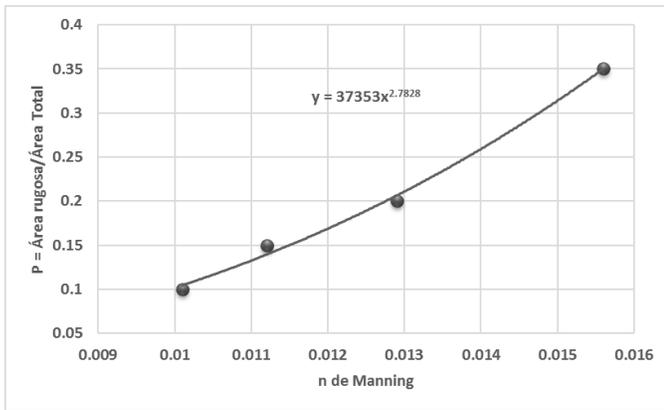


Fig. 8. Ensayo Valor de la distancia de separación vs coeficiente de rugosidad requerido.

#### IV. REFERENCIAS

- [1] Peña, J. (2014) “Método de representación de la rugosidad de los túneles para el modelo físico de Chaglla”. Universidad de Piura, Piura, Perú.
- [2] Bureau of Reclamation. (1977) “Friction factor for large conduits flowing full”. A water resources technical publication, Washinton DC, EEUU.
- [3] Fernandez, J. (1997) “Manual para laboratorios de hidráulica de ingeniería civil”. Primera edición, Universidad de Granada, España.
- [4] Rocha, Arturo (2007). “Hidráulica de tuberías y canales”. Primera edición. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- [5] Chow, V.T. (1983) “Hidráulica de canales abiertos”. Editorial Diana, Primera edición, Mexico.